

分布型光ファイバセンシングシステムによる台湾の鉄道の健全性モニタリング

ニューブレクス(株) 正会員 ○三輪 滋
OlitGlobal Technologies 林 睿遠 リンレイエン
ニューブレクス(株) 正会員 岸田 欣増

1. はじめに

社会資本の老朽化が進むなか、慢性的な人手不足、少子高齢化、経済の停滞といった社会的な課題に加えて、気候変動の影響による自然災害の頻発といった地球規模の課題など、構造物への一層の負の影響を及ぼす課題が数多く存在する。持続可能な社会を構築するには、省資源・省エネルギー・高効率な新たな維持管理手法の導入によって、インフラ構造物を長寿命化することが要請されている^{1),2)}。光ファイバケーブルを用いて、連続的に長距離を短時間で計測できる分布型光ファイバセンシング技術(DFOS: Distributed Fiber Optic Sensing)は、これらの課題を解決する有効な手段の一つとして期待されている。岸田らは、これまで用いられていたブリルアン散乱光に加えてレイリー散乱光にも着目して、高度な光周波数制御から大量高速信号処理までの独自のハード技術と、温度とひずみの分離、計測位置とその変化の特定といった散乱光の分析、自動データ処理など独自のソフト技術を確立することで、これまでにない高精度、高空間分解能、短計測時間の分布型光ファイバセンシング技術を開発し、構造物の維持管理のための健全性モニタリングシステムとしての実装を実現可能とし^{3),4),5),6),7),8)}、さまざまな分野に適用している。ここでは、その技術の概要と、台湾の鉄道の橋梁構造物の健全性モニタリングを適用の一事例として述べる。

2. 分布型光ファイバセンシング

(1) 光ファイバセンシングの歩み

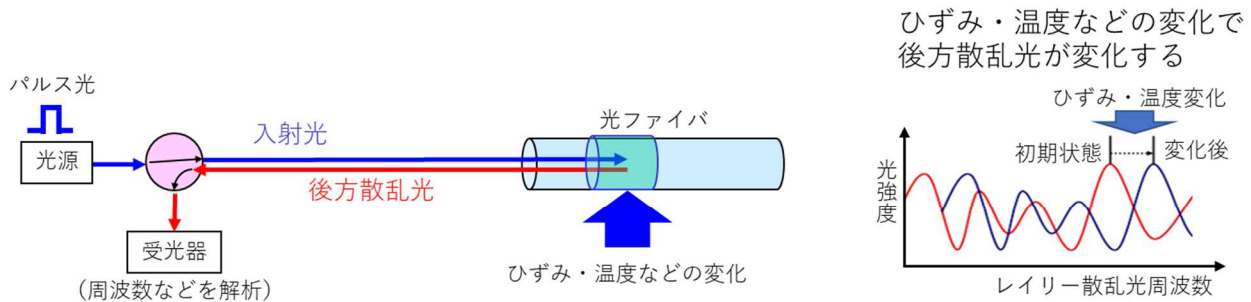
光ファイバの伝送の損失が20dB/kmを下回った1970年は、光ファイバ通信技術の誕生年と言われている⁹⁾。1976年に通信線路としての光ファイバを監視する技術として考案されたOTDR(Optical Time Domain Reflectometry)は、その後、光ファイバ中の散乱現象を利用することで、センシング技術として活用されることになる。このように光ファイバセンシング技術は、光ファイバ通信技術と歩調を合わせて進歩発展してきたとされ⁹⁾、すでに50年近くに歳月が流れている。光ファイバセンシングは大きく分けて多点型の計測法と分布型の計測法がある。前者では、ファイバ上の特定点にFBG(Fiber Bragg Grating)という特定の波長だけ反射する格子構造を光ファイバ上の複数点に設けて計測する、いわば、従来の電気式センサを置き換えたものが、同一の光ファイバケーブル上に多点で配置される⁴⁾方式がよく知られている。一方、分布型光ファイバセンシングは、**図-1**に示すように、光ファイバに光を入射すると一部戻ってくる反射光(後方散乱光)がひずみ・温度などにより変化する現象をセンサとして活用する技術⁵⁾である。本報告では分布型光ファイバセンシングに絞って論ずる。

(2) 分布型光ファイバセンシング技術の進歩

光ファイバの後方散乱には、**図-2**に示すように、ラマン、ブリルアン、レイリーの3つがある⁹⁾。ラマン散乱は温度の変化で光の強度が変化することを利用し、温度計測に用いられる技術で、従来から利用されている。ブリルアン散乱は、ひずみ・温度の変化で散乱光の周波数がシフトすることを利用し、温度・ひずみの計測に用いられる技術で、これも従来から利用されていたが、建設分野においては、要求性能に比べて精度が低く、利用は低調であった。レイリー散乱は、ひずみ・温度の変化で散乱光の強度波形が周波数方向にシフトすることを利用し、温度・ひずみの計測に用いられるものである。レイリー散乱はもっとも強度が強く、圧力・温度・ひずみにより散乱光の波形が変化することがわかっていたので、期待度は高かったものの、高度な光周波数制

キーワード 光ファイバセンシング, 分布型, 維持管理, 動的計測, DAS

連絡先 〒650-0023 神戸市中央区栄町通1丁目1番24号 ニューブレクス株式会社 TEL: 078-335-3510



光ファイバに光を入射すると一部戻ってくる反射光（後方散乱光）が
ひずみ・温度などにより変化する現象をセンサとして活用

図-1 分布型光ファイバセンシングのしくみ(文献 4)の図に加筆)

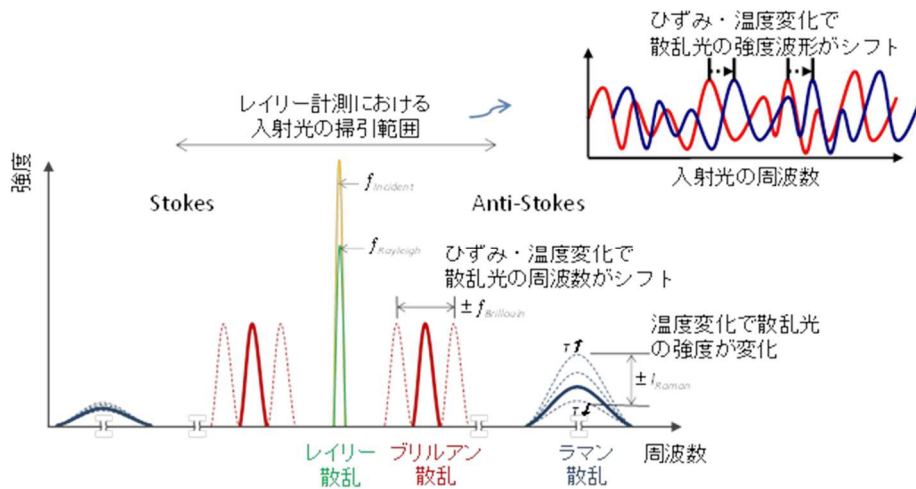


図-2 分布型光ファイバセンシングに用いる散乱光の種類(文献 4)の図を引用)

御と大量高速の信号処理が困難で分布計測に活用することがなかなかできなかった技術であるが、岸田らがこの方式を実用化した^{4),5),7)}。さらに、レイリー散乱が、ひずみ変化に敏感に反応すること利用し、その位相の変化をとらえ振動・音響を高速に動的に計測する方法（DAS : Distributed Acoustic Sensing）が開発されている。

(3) 分布型光ファイバセンシングの特徴

これまで、分布型計測ではブリルアン方式が、1990年代から2000年代初頭に建設分野への導入が試みられたものの、当時の空間分解能（位置特定の精度）やひずみ測定精度が粗く、要求性能を満足しなかったことであまり浸透しなかった。岸田らは、2002年以降に光ファイバセンシングに関する先進的技術の開発を進め、

表-1 開発された技術と従来技術の比較

(a) 静的計測

(b) 動的計測

項目	電気計測	光ファイバ分布計測		
		開発技術		従来技術
		レイリー方式	ブリルアン方式	ブリルアン方式
センサ	ひずみゲージ Pt温度計	光ファイバ	光ファイバ	光ファイバ
最大計測範囲	数cm程度/1個	25km	25km	25km
最高空間分解能	(0.5~3cm)程度 ^{*1}	2cm	10cm	1m程度
最小サンプリング間隔	—	1cm	2cm, 10cm ^{*3}	1m程度
ひずみ計測精度	1μ ϵ 程度	1μ ϵ 以下	10μ ϵ 程度	50~100μ ϵ
温度計測精度	0.1~0.5℃程度	0.1℃以下	5℃程度	5℃程度
計測時間	— ^{*2}	数分/回	数分/回	数十分/回
長期耐久性	△	○		
防爆性	×(要対策)	○		

*1: ひずみゲージのベース長

*2: 分布計測ではないので比較しない(測点数が多いと時間がかかる)

*3: 計測方式で変わる

項目	開発したDAS	従来のDAS
最大測定距離(km)	120km	70~100km
最高空間分解能	1m	2m~5m
最小サンプリング間隔	0.2m	1m以上
最短ゲージ長	0.2m	2~4m
最高サンプリングレート	25 k Sps	25 k Sps
感度	noise floorが25dB程度違う	
長期耐久性	○	○
防爆性	○	○

高度な光周波数制御から大量高速信号処理までの独自のハード技術と、温度とひずみの分離、計測位置とその変化の特定といった散乱光の分析、自動データ処理など独自のソフト技術を確認することで、ブリルアン方式の高度化はもとより、新たにレイリー方式も実用化し、これまでにない高精度、高空間分解能、短計測時間の分布型光ファイバセンシング技術を開発した^{3),4),5),6),7),8)}。表-1にそれぞれの技術を従来の技術と比較して示す。

ブリルアン方式では、従来のブリルアン方式の精度の10倍となる6 $\mu\epsilon$ を実現し、レイリー方式では、これまでの電気式のひずみゲージと同等あるいはそれ以上の1 $\mu\epsilon$ 以下の計測精度を実現するとともに、位置特定の精度も2cmを実現した。これは、長さ数キロにも及ぶ一本の光ファイバケーブルを設置して計測することで、その長さ全体にわたって、長さ2cmのひずみゲージを連続して配置(5kmの場合：250,000点)して計測するのと同様の計測を実現できることを意味する。DASについても従来のDASに比べて、空間分解能や感度において、高精度の技術を開発している¹⁰⁾。

これまで建設分野でよく用いられていた電気式計測と比較する。従来の電気センサ(ひずみゲージ、熱電対など)はセンサおよび測定器の単価は低コストであるものの、①センサ1台で計測箇所1点に対応しなければならない、②設置箇所の選定には変状予測が必要、③大型構造物には多量のセンサが必要、④長期的には電気的絶縁が低下、⑤防爆対応が必要といった課題があり、計測規模が大きくなるほどトータルコストは高くなる傾向にあった。一方で、分布型光ファイバセンシングでは、①1本の光ファイバで変状の大きさと場所が分かる、②敷設施工がシンプルである、③大規模になるとコストに優位性が生じやすい、④長期耐久性を有する、⑤完全防爆(光ファイバの原材料：石英ガラス)である、などの特徴をもつので、一般的に大規模で長期の計測において、性能面・経済面などで優位性をもつと考えられる。これらの特徴を表-2にまとめて示す。

表-2 電気式センシングと分布型光ファイバセンシングの比較

項目	従来の電気式センサ	光ファイバ分布センシング
センサの配置	センサ1台で計測箇所1点に対応	1本の光ファイバ
規模の大きな計測への対応	大量のセンサとケーブルが必要	複数本を配置しても施工はシンプル
現象の最大値の把握	設置箇所の選定には変状予測が必要	分布型で計測するので把握しやすい
長期耐久性	せいぜい10年	20年以上
絶縁性	長期的には低下	○
防爆性	×(要対策)	○
計測器単価	◎	△
小規模短期計測のコスト	○	△
中大規模計測のコスト	△	○
中大規模長期計測のコスト	×	◎

開発された分布型光ファイバセンシング技術は、実証試験を重ね測定精度や施工性などを確認した上^{5),6),7),8)}で、施工時の管理や構造物の維持管理^{7),11)}、また海外においては、放射性廃棄物処分場^{4),12)}や、油井の運用管理^{4),10)}など様々な分野での適用が進められている。

3. 台湾の鉄道構造物の維持管理への適用

(1) 計測システムの概要

具体的な構造物の監視への適用事例として、台湾における鉄道構造物への適用について以下に示す。台湾のある鉄道において、約1kmの区間の橋梁構造物に、分布型光ファイバセンシングシステム(DSS : Distributed Strain Sensing System)を設置し、構造物の健全性モニタリングが試行的に実施された。図-3に光ファイバケーブルの橋桁への設置位置と設置の様子を示す。構造物の完成後、光ファイバケーブルを設置したので、表面の平滑化处理、掃除、設置位置の水引、光ファイバケーブルにプレテンションを掛けて固定し、表面を保護するという手順で設置している。橋桁の4つの象限に配置することで、軸方向のひずみに加え、曲率も求めることができ、それらを積分、あるいは2回積分することで軸方向変位、水平方向の曲げ変位、垂直方向の曲げ変

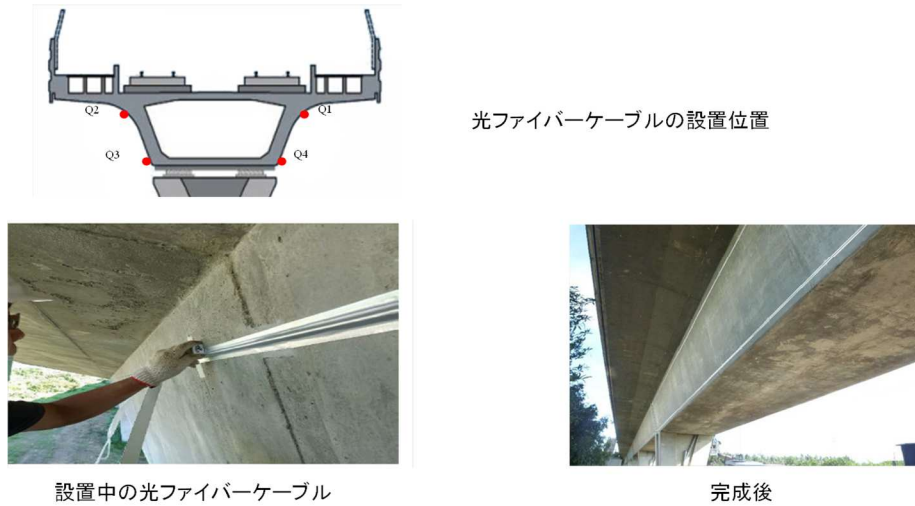


図-3 光ファイバケーブルの橋桁への設置位置と設置の様子

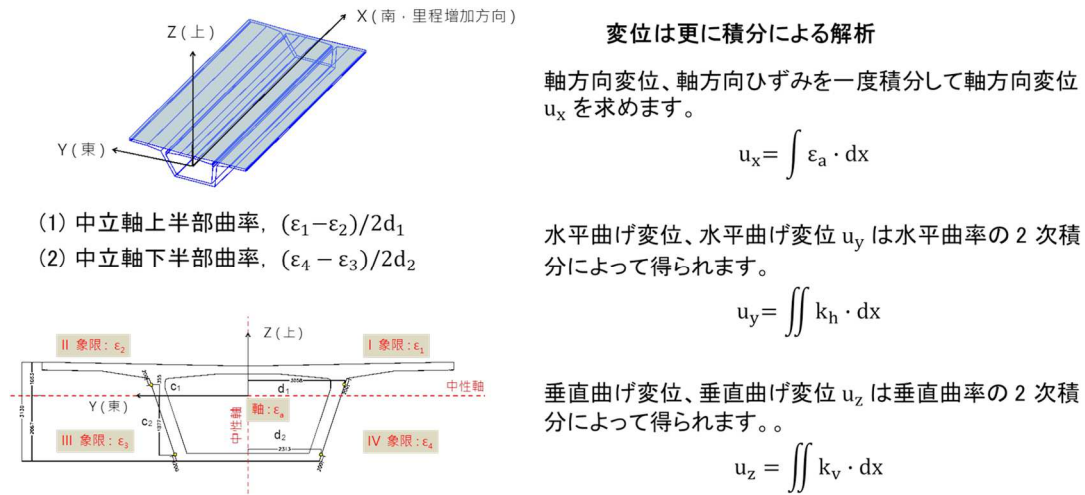


図-4 4 象限への光ファイバケーブルの配置と変位を求める解析モデル¹³⁾

位を求めることができ、構造物の変形を把握することができる。これらの解析のモデル¹³⁾を図-4に示す。橋桁と橋桁の接続部は、大きな伸縮や回転が予想されるので、厚さ 1.5mm の鋼板による伸縮継手を設けている。あらかじめ鋼板の変形と、それに伴う光ファイバ散乱光の周波数のシフト量をキャリブレーションすることで、変位量を求めている。設置区間の長さは 990m、橋桁は 33 径間、伸縮継手は 32 個である。計測区間内には、比較的地盤が悪いところがあり、その部分を重点監視区間と定めている。計測は 2021 年 9 月に開始された。ここでは計測は、開発された高性能のブリルアン方式で行われ、測定サンプリング間隔は 5cm、空間分解能 50cm、計測時間間隔は 1 時間に 1 回である。ひずみの計測精度は 10 $\mu\epsilon$ である。温度補償については、温度計測用のケーブルをひずみ計測用のケーブルに沿って設置した上に、局所的な温度の参照値を得るため、別途小さな測候所を橋梁に設置した。また、2.9km 離れた台湾気象台の測候所の記録をグローバルな参照値とした。

(2) 計測結果の一例

計測結果は、産業監視制御システム(SCADA : Supervisory Control and Data Acquisition)によって表示される。監視区間全体の表示の一例を図-5に示す。特に注目する区間の変形図や詳細な情報の表示を図-6に示す。変形図では、色調で変形量が示されている。詳細情報では、特定の位置における、それぞれの象限の軸ひずみ量、軸方向変位、水平変位、鉛直変位が表示される。安全管理の基準は、設計をもとに設定されてお

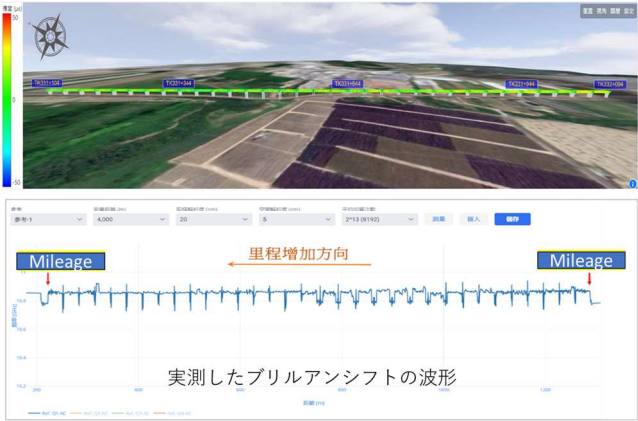


図-5 SCADA システムによる監視区間全体の表示

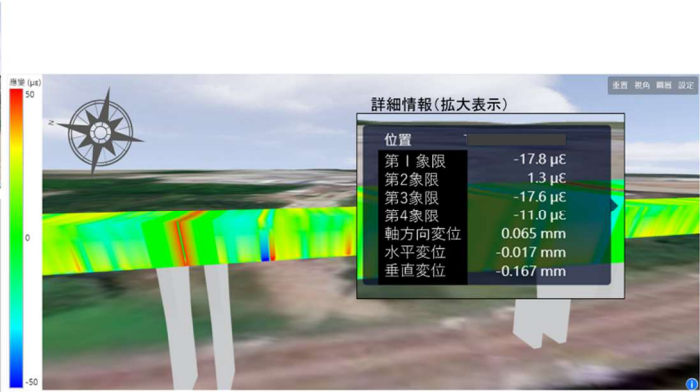


図-6 注目する区間の変形図や詳細な情報の表示

表-3 安全管理基準の警戒値, 点検実施基準値

	水平変位(mm)	垂直変位(mm)
嚴重警告(行動値) : 点検実施の基準値	6	7.5
主要警告(管理値) : 警戒管理値	4	5

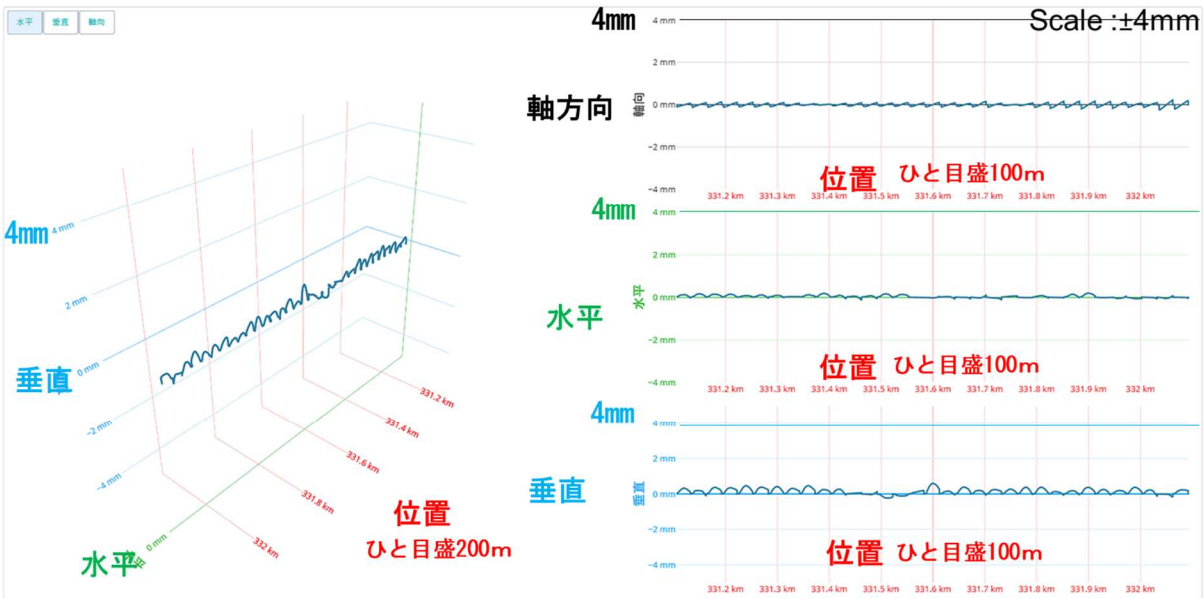


図-7 監視区間全体の変形の結果の一例

り、許容値の 1/3 を警戒管理値、2/3 を点検実施の基準値としている。警戒管理値は、それぞれ水平で 4mm、鉛直で 5mm である。これらを表-3 に示す。監視区間全体の変形の結果の一例を図-7 に示す。この例では、警戒管理値をはるかに下回っていることがわかる。図-8 に 1 ヶ月間の経時変化を示す。昼夜のひずみの変化は、4 象限ともほぼ同様であることがわかる。

(3) 地震後の橋梁構造の安全性確認

台湾東部で 2022 年 9 月 17 日に $M_L6.4$ の地震、2022 年 9 月 18 日に $M_L6.8$ の地震が発生した。橋梁の計測地点で、観測された震度は、それぞれ 5、3 であった。台湾の震度をおおよそ日本の震度と同等である。発生直後に、SCADA システムは「被害確認モード」を起動し、計測区間の橋梁を迅速に計測し、分析した上で「橋梁構造に変化はない」ことを鉄道の関係者に迅速に通知した。

地震後に計測した時点でのひずみの一例として、9 月 17 日の地震の際の橋桁の上部の左右のひずみの差を

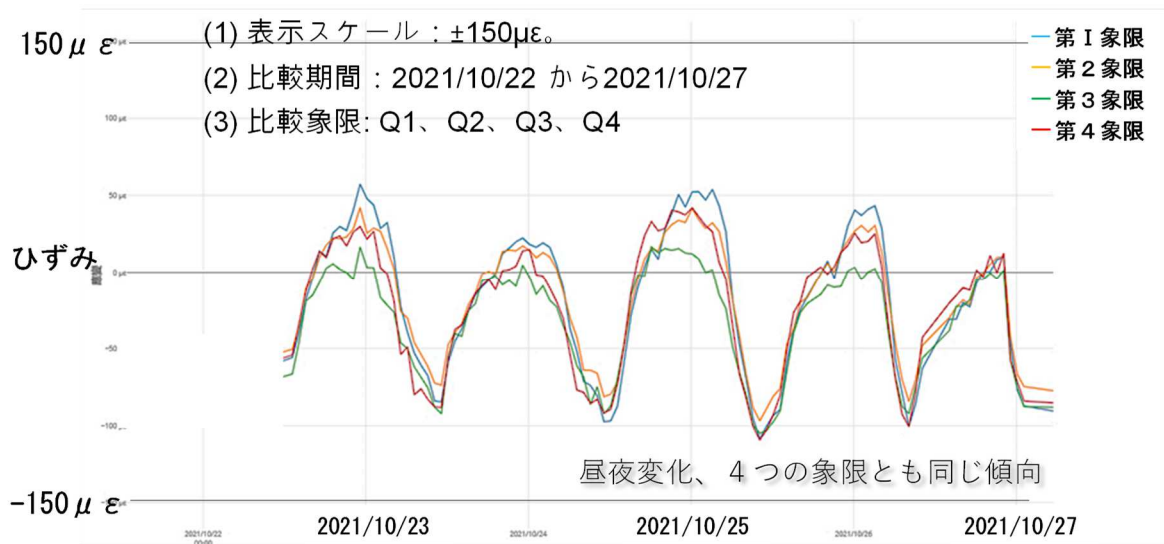


図-8 経時変化 (4 象限の比較)

図-9 に示す．図中で大きな値を示している部分は、橋桁の連結部である、橋桁部分と連結部では挙動が違うので、評価は別々に行っている．下部の左右、西側および東側の上面と下面の比較においてもほぼ同程度のひずみが観測された．また、9月18日の地震においても、ひずみはこれらの観測値に比べ同等以下であった．水平のひずみは $20\mu\epsilon$ 以下であり、変位の警戒管理値 4mm に相当する $4000\mu\epsilon$ に比べ十分に小さい値であった．継手部についても、変位の警戒管理値 $16\text{mm} \sim 8\text{mm}$ に相当するひずみ $16000 \sim 8000\mu\epsilon$ に対して、最大ひずみは $130\mu\epsilon$ であった．このように、分布型光ファイバセンシングシステムによって、地震後、安全性が確保されていることが迅速に確認された．

上部の左と右の比較

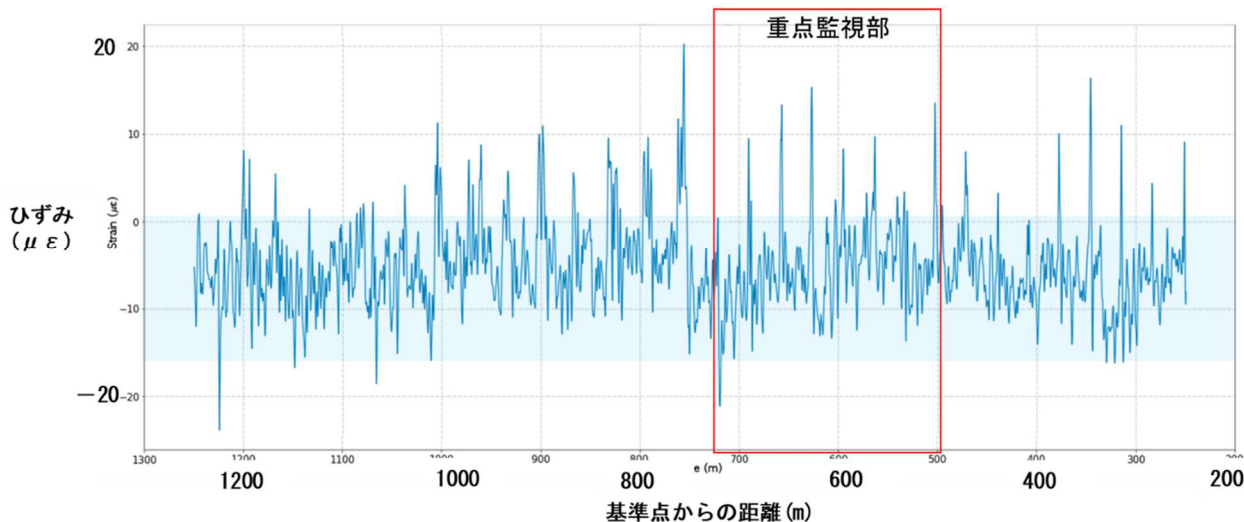


図-9 2022年9月17日の地震の際の橋桁の上部の左右のひずみの差

4. 台湾の鉄道における動的計測

構造監視のために実装された光ファイバを用いて、列車走行時の挙動を対象として、2023年4月に一時的に動的な計測を実施した．用いたシステムは前述した高性能の DAS である．計測の概念図を図-10 に示す．計測では、空間分解能を 1m 、 1000Hz サンプルングで実施した．計測された挙動の一例を図-11 に示す．DAS で直接計測されるひずみの変化率 (Strain Rate) を色の濃淡で示す．縦軸は距離、横軸は時間であり、時間が経つにつれて列車が基準点（ここでは上端）に近づいてくる様子が明瞭にわかる．波形が中央でくの字型をし

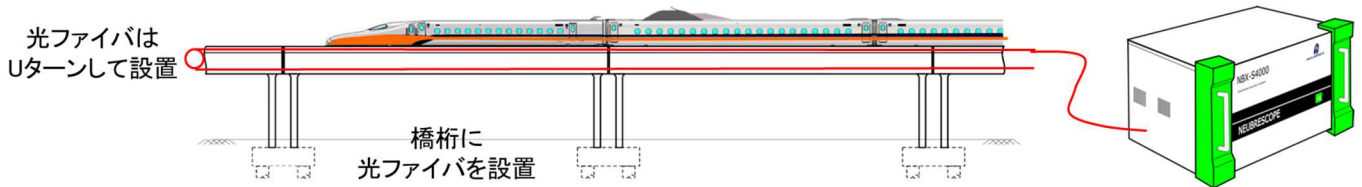


図-10 動的計測の概念図

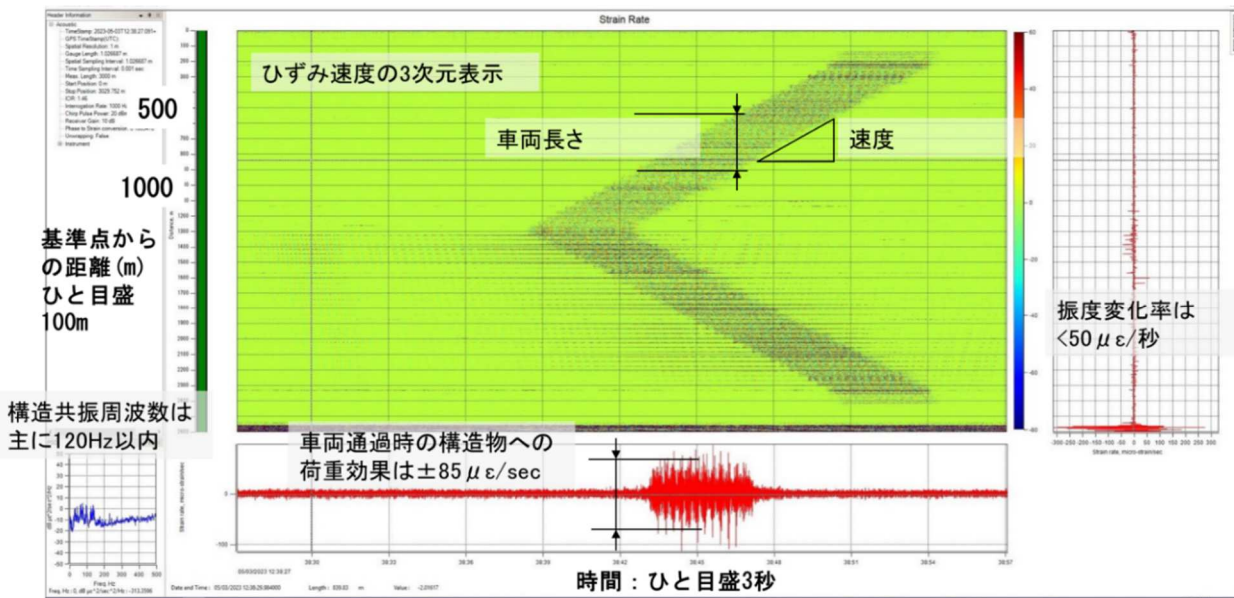


図-11 列車通過時に計測され構造物の挙動の一例

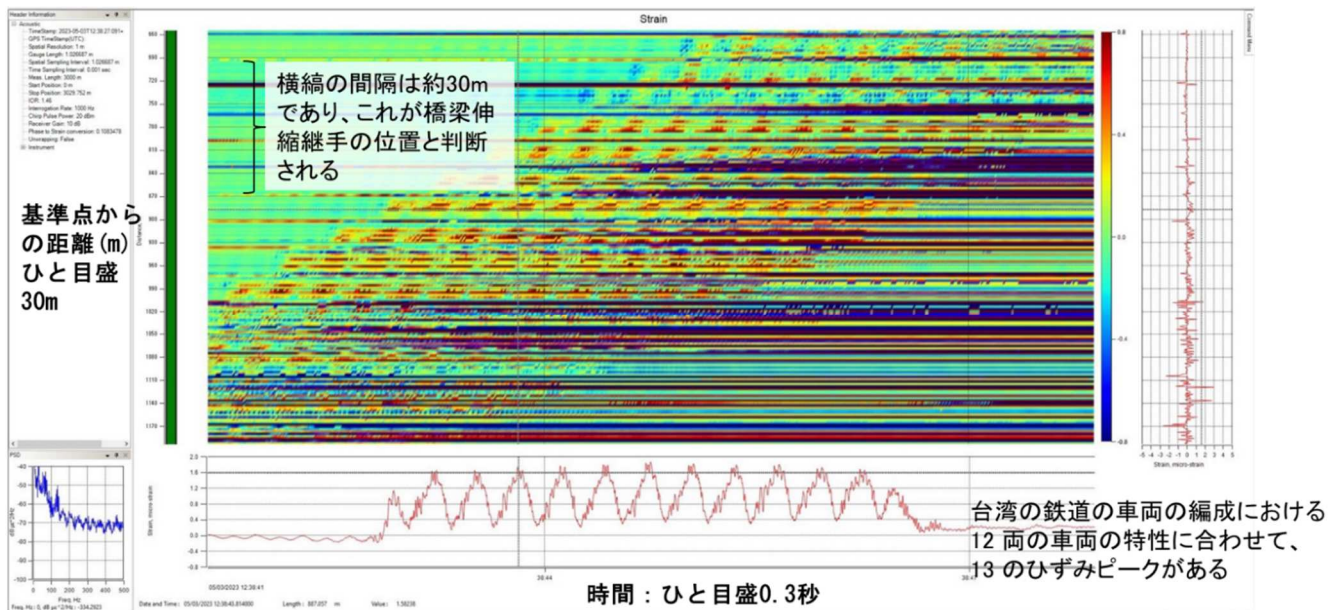


図-12 列車通過時のひずみの変動

ているのは、光ファイバケーブルが折り返して設置されているためである。列車を示す濃い部分の縦の幅は列車の長さであり、角度から速度を求めることが出来る。ある計測点での振動波形が下の図に示されている。列車通過時の構造物への荷重の効果は、おおよそ $\pm 85 \mu\epsilon/\text{sec}$ である。

横軸をひずみに変換し、拡大した図を図-12に示す。横縞状の部分が等間隔で見られるが、おおよそ30mであり、橋梁伸縮継手の位置と判断される。ひずみ波形には、両端の振幅が小さく、中間の振幅がほぼ同じの合計13のピークが見られる。これは列車編成が12両で、両端は1台の台車からの振動、中間は連結された車両

両側の2つの台車による振動の影響が観測されたと判断できる。ひずみ分布図を横軸方向に見ると、列車通過部分でひずみの濃淡が見られる。橋桁両端は、脚柱によって支持され変形が小さく、橋桁中央部は列車振動より振幅が大きくなっていることを示している。このように、DAS 計測により、列車の通過時の振動が詳細に記録され、それにより構造物の特性を明瞭に捉えることができた。これは、列車走行を用いて、構造物の構造特性を明らかにし、その変化を構造物の健全性モニタリングに生かすことの可能性を示したものである。また、列車走行のデータから、列車そのものの異常を感知できる可能性も示唆される。静的なモニタリングと組み合わせることで、より高度な健全性モニタリングが可能となることが期待される。

以上のような分布型光ファイバセンシングの良好な計測結果を踏まえて、路線全線への適用が検討されている。

5. まとめ

分布型光ファイバセンシング技術の特長と最近の技術の進展を紹介するとともに、具体的な適用事例として台湾の鉄道構造物のモニタリングについて述べた。近年の分布型光ファイバセンシング技術の進展は著しく、構造物の健全性モニタリングへの適用の幅は益々広がって行くことが予想される。社会基盤構造物には、多くの場合それに沿って通信用の光ファイバケーブルが敷設されている場合が多い。それらを利用しつつ、かつ、重要な構造物や地点には、計測専用の光ファイバケーブルを敷設することで、構造物の健全性監視を広範かつより高度に実施していくことが可能となる。今後、光ファイバセンシングが、社会基盤など多様な構造物の「人工神経」³⁾として機能することが期待される。

参考文献

- 1)インフラ老朽化対策の推進に関する関係省庁連絡会議：インフラ長寿命化基本計画，
https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/sosei_point_mn_000010.html, 2013.
- 2)国土交通省：インフラ長寿命化計画（行動計画）令和3年度～令和7年度，
https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/_pdf/chozyumyou2kaitei_honbun.pdf, 2021.3 制定，2024.4 改訂.
- 3)山内良昭，李哲賢，岸田欣増，王勇：分布型光ファイバセンシングによる構造物の健全性監視システム，
光学，36 巻 1 号，pp.24-28，2007.
- 4)岸田欣増，山内良昭，西口憲一：光ファイバ分布型センサーの最近の進展と光ファイバケーブルの新視点，
光学，46 巻 8 号，pp.323-329，2017.
- 5) Kinzo KISHIDA, Yoshiaki YAMAUCHI and Artur GUZIK: Study of Optical Fibers Strain-Temperature Sensitivities Using Hybrid Brillouin-Rayleigh System, PHOTONIC SENSORS / Vol. 4, No. 1, pp.1-11, 2014.
- 6) Ken'ichi Nishiguchi, Che-Hsien Li, Artur Guzik and Kinzo Kishida: Synthetic Spectrum Approach for Brillouin Optical Time-Domain Reflectometry, Sensors 2014, 14, 4731-4754; doi:10.3390/s140304731, 2014.
- 7) Kinzo Kishida, Michio Imai, Junichi Kawabata and Artur Guzik: Distributed Optical Fiber Sensors for Monitoring of Civil Engineering Structures, Sensors 2022, 22, 4368. <https://doi.org/10.3390/s22124368>, 2022.
- 8)岸田欣増，山内良昭，松田公彦：土木分野の現場適用へ向けた光ファイバ分布計測技術の新たな知見，令和5年度土木学会全国大会第78回年次学術講演会講演概要集，CS9-44，2023.
- 9)保立和夫：光ファイバセンシング，光学，41 巻 7 号，pp.352-363，2012.
- 10) G. Jin; G. Ugueto; M. Wojtaszek; A. Guzik; D. Jurick and ; K. Kishida: Novel Near-Wellbore Fracture Diagnosis for Unconventional Wells Using High-Resolution Distributed Strain Sensing during Production, SPE J. 26 (05): 3255-3264., Paper Number: SPE-205394-PA, <https://doi.org/10.2118/205394-PA>, 2021.
- 11)樽谷早智子，新原雄二，新井崇裕，今井道男，平佐健一，野津厚，小濱英司，大矢陽介，山路徹：羽田空港 D 滑走路における光ファイバレイリー計測による維持管理への適用検討，土木学会第78回年次学術講演会講演概要集，CS9-15，2023.
- 12)岸田欣増，山内良昭：単一 SM ファイバによる温度・ひずみ同時計測の長期現場検証，信学技報，Vol. 121, No. 332，OFT2021-57，pp. 11-16，2022.
- 13) Hsiao-Chen Su, Tseng-Hsing Hsu, Yu-Lin Lee, Wen-Kuei Hsu, Nien-Tsu Yang and Ning-Hsuan Chang: Fiber Monitoring System Applied to Railway Bridge Structures in a Near-Fault Region, Applied Sciences, 2024, 14, 7883. <https://doi.org/10.3390/app14177883>